

**The Effect of Installing Semi-circular Rotary Gate in Rectangular Canals on Flow Hydraulics***

Research Article

Mehrdad Kheiraei¹, Hojjat Allah Yonesi² , Babk Shahinejad³, Hassan TorabiPoudeh⁴, Ava Maraashi⁵DOI: [10.22067/jfcei.2026.94812.1369](https://doi.org/10.22067/jfcei.2026.94812.1369)**1. Introduction**

The rotary gate is an innovative structure designed for upstream water level control (Marashi et al., 2019). It operates by rotating around a vertical axis and offers several advantages, including low actuation force, rapid response time, reduced sediment accumulation, and the elimination of sealing requirements during operation. Previous studies have shown that both the gate opening angle and the submergence ratio significantly influence the discharge coefficient. Accordingly, empirical relationships were developed to estimate discharge under varying flow conditions (Marashi et al., 2021). Moreover, experimental investigations involving semi-circular rotary gates installed in rectangular channels with gradual transitions revealed that increasing the opening angle or decreasing the transition length enhances the discharge coefficient (Khairaei et al., 2025).

The present study examines the hydraulic behavior of a semi-circular rotary gate placed in a rectangular channel featuring a gradual transition. The effects of gate opening angle, transition length, and flow discharge on flow distribution and energy loss are analyzed. In addition, empirical relationships are proposed to estimate the discharge passing through both sides of the gate and the associated energy loss under free-flow conditions. These relationships aim to provide a comprehensive evaluation of the gate's performance as a dual-purpose structure for both water level control and flow measurement.

2. Materials and Methods

Experiments were conducted in a rectangular laboratory canal measuring 12 m in length, 0.6 m in width, and 0.5 m in height, with a longitudinal bed slope of 0.00088. Flow was supplied by a centrifugal pump from an underground reservoir to a constant-head tank. The flow rate was measured upstream using an electromagnetic flowmeter with an accuracy of ± 0.01 L/s. A hinged gate

was installed at the downstream end of the flume to maintain free-flow conditions. Flow velocity was measured using a three-dimensional (3D) velocimeter.

Gradual transitions from a rectangular to a semicircular cross-section were fabricated from galvanized steel sheets with a thickness of 0.004 m. Three transition lengths were considered: 0.6, 0.9, and 1.2 m. The transitions were designed to be smooth and continuous in order to minimize geometric discontinuities and associated flow instabilities. The downstream end of each transition was connected to a semicircular frame with a diameter of 0.6 m, which served as the mounting structure for a semicircular rotary gate. The gate was constructed from 2 mm thick steel, and its opening angle was adjusted using a graduated ring. Gate opening angles were tested from 35° to 85° in 5° increments, while flow rates ranged from 0.020 to 0.038 m³/s with an interval of 0.002 m³/s. Figure 1 shows different implementations of the physical model.

**Figure 1** Different parts of the physical model**3. Results and Discussion**

Analysis of the flow through the rotary gate in a rectangular channel indicates that the impact of the flow on the gate edge causes it to split into left and right sides, each with distinct cross-sectional areas and flow characteristics. The results show that the right-side cross-

* Manuscript received August 08, 2025, Revised December 28, 2025, Accepted February 28, 2026.

¹ Ph.D. Student in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran.² Corresponding author. Associate Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran.Email: yonesi.h@lu.ac.ir.³ Assistant Professor, Water Engineering Department, Lorestan University, Lorestan, Iran.⁴ Professor, Water Engineering Department, Lorestan University, Lorestan, Iran.⁵ Graduate of Hydraulic Structures, Water Engineering Department, Lorestan University, Lorestan, Iran.

section is mostly located on the fixed semi-circular transition and is not influenced by the upstream gradual transition length, but increases solely with the gate opening angle. In contrast, the left-side cross-section depends not only on the gate opening angle and flow depth but also on the length of the gradual transition; the shortest transition produces the largest left-side cross-section, while the longest yields the smallest. This difference leads to the right-side cross-section being smaller than the left for a given opening angle, and the total flow through the gate ($A_W = A_R + A_L$) is influenced by both the transition length and opening angle.

The transverse water surface profiles show that increasing the gate opening angle reduces lateral variations, improving flow depth uniformity. The largest depth fluctuations occur at 35° and the smallest at 85° . To control non-uniformity, gradual transitions of different lengths and precise gate angle adjustment proved effective.

The flow velocity distribution differs between the two sides of the gate. On the right side, velocities are higher but decrease as the gate opening angle increases. In contrast, the velocity on the left side remains nearly constant regardless of the opening angle. This indicates that the increased flow rate through the left side is primarily due to the enlargement of its cross-sectional area rather than a change in velocity.

Analysis of the flow split between the two sides reveals that increasing the gate opening angle raises the proportion of flow passing through the left side while reducing that through the right side. Additionally, variations in the gradual transition length alter the flow distribution between the two sides. Despite these changes in flow distribution, the total flow rate through the gate remains nearly constant and exhibits a linear relationship with the opening angle. Figure 2 shows the changes in the percentage of flow passing through the left and right sections of the rotary gate as a function of its opening angle.

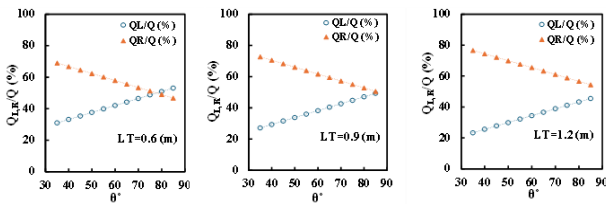


Figure 2 The changes in the percentage of flow passing through the sides of the gate due to changes in the gate opening angle.

Finally, the following equations are proposed to calculate the flow rate passing through the left and right sides of the rotary gate as a function of the gate opening angle and the gradual transition length.

$$\frac{Q_R}{Q} = (0.769 - 0.254\theta + 0.076 \frac{L_T}{B}) \times 100 \quad (1)$$

$$\frac{Q_L}{Q} = (0.231 + 0.254\theta - 0.076 \frac{L_T}{B}) \times 100 \quad (2)$$

In these equations, the opening angle (θ) is expressed in radians, the transition length (L_T) in meters, the canal width (B) in meters, and the flow rate ratios as percentages.

Energy loss analysis indicates that the highest losses occur at small gate openings (35°), while the lowest losses are observed at large openings (85°). The gate opening angle is the most significant factor influencing relative energy loss, with the transition length playing a secondary role (Figure 3).

Experimental data and corresponding calculations reveal a nearly linear relationship between flow rate and energy loss. Furthermore, the estimated relative energy loss shows good agreement with laboratory measurements. The following equation is proposed to calculate the relative energy loss of the rotary gate under free-flow conditions.

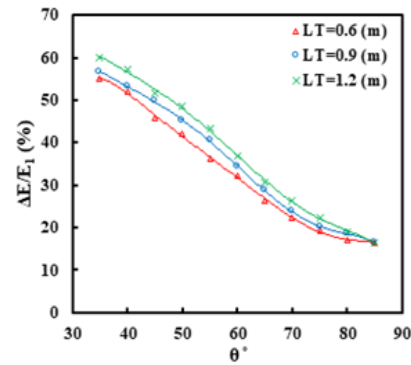


Figure 3 Effect of gradual transition length on relative energy loss

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \xi \quad (3)$$

$$\xi = 0.090 + 0.513\theta - 0.010 \frac{L_T}{B} \quad 35^\circ \leq \theta \leq 85^\circ \quad (4)$$

4. Conclusion

The results indicate that the interaction of the flow with the edge of the rotary gate causes flow separation and lateral variations in the water surface profile. Increasing the gate opening angle reduces these variations, with the most pronounced effects observed at 35° and the least at 85° .

Flow velocity and discharge are higher on the right side of the gate; however, they decrease as the opening angle increases, while the flow on the left side increases correspondingly. The length of the gradual transition also influences the discharge distribution: increasing the transition length reduces the left-side discharge and increases the right-side discharge.

Higher flow rates result in greater energy loss, although this effect diminishes as the gate opening angle increases. Finally, precise empirical relationships are provided for calculating the discharge through both sides of the gate and the associated energy loss under free-flow conditions.



تأثیر کارگذاری دریچه دوار نیم‌دایره‌ای در کانال‌های مستطیلی بر هیدرولیک جریان*

مقاله پژوهشی

مهرداد خیرایی^(۱) حجت الله یونسی^(۲) بابک شاهی نژاد^(۳) حسن ترابی پوده^(۴) آوا مرعشی^(۵)

DOI: 10.22067/jfpei.2026.94812.1369

چکیده در این تحقیق، عملکرد هیدرولیکی یک دریچه دوار نیم‌دایره‌ای با قطر 6/0 متر و به همراه تبدیل تدریجی با سه طول متفاوت در یک کانال مستطیلی بررسی شده است. آزمایش‌ها در دامنه گسترده‌ای از دبی، عمق‌های بالادست و زاویه‌های بازشدگی دریچه انجام شد. برخورد جریان با لبه دریچه دوار موجب تقسیم جریان و تغییرات عرضی در سطح آب می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، این تغییرات کاهش می‌یابد. بیشترین ناپایداری در زاویه ۳۵ درجه و کمترین در ۸۵ درجه رخ می‌دهد. سرعت و دبی در سمت راست بیشتر است، اما با افزایش زاویه، کاهش می‌یابد. در سمت چپ، سرعت تقریباً ثابت مانده و افزایش دبی ناشی از افزایش سطح مقطع جریان است. افزایش زاویه بازشدگی باعث انتقال بیشتر جریان به سمت چپ می‌شود. همچنین، افزایش طول تبدیل تدریجی، دبی سمت راست را افزایش و سمت چپ را کاهش می‌دهد. در مجموع، با افزایش زاویه یا کاهش طول تبدیل، جریان بیشتری از سمت چپ عبور می‌کند. افزایش افت انرژی با میزان افزایش دبی عبوری جریان رابطه مستقیم و با مقدار زاویه بازشدگی دریچه رابطه عکس دارد. بیشترین افت انرژی مربوط به زاویه ۳۵ درجه و کمترین آن به زاویه ۸۵ درجه است. در نهایت، روابطی برای محاسبه دبی عبوری از دو طرف دریچه دوار و افت انرژی در شرایط جریان آزاد ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی دریچه نیم‌دایره‌ای دوار، افت انرژی، جریان آزاد، توزیع جریان، کانال مستطیلی.

The Effect of Installing Semi-circular Rotary Gate in Rectangular Canals on Flow Hydraulics

Mehrdad Kheiraei Hojjat Allah Yonesi Babk Shahinejad Hassan TorabiPoudeh Ava Maraashi

Abstract In this study, the hydraulic performance of a semi-circular rotary gate, along with a gradual transition with three different lengths in a rectangular canal, was investigated. Experiments were conducted using various flow rates, upstream water depths, and gate opening angles. The interaction of the flow with the edge of the rotary gate causes flow division and lateral variations in the water surface. Results showed that these variations decrease as the gate opening angle increases, with the highest instability occurring at an angle of 35 degrees and the lowest at 85 degrees. The velocity and discharge on the right side of the gate were higher, but both decreased with an increase in the gate angle. The velocity on the left side was almost constant, but the discharge increased due to a larger flow cross-section. More flow was diverted to the left side with an increase in the gate opening angle. The discharge on the right side was increased while the discharge on the left was decreased by increasing the length of the gradual transition. Increasing the gate angle or reducing the transition length resulted in a greater share of flow passing through the left side overall. Energy loss increases directly with flow rate and has an inverse relationship with the gate opening angle. The highest energy loss occurred at a 35-degree opening and the lowest at 85 degrees. Finally, relationships are presented that determine the discharge through both sides of the rotary gate and the energy loss in this structure.

Key words Semi-Circular Rotary Gate, Energy loss, Free Flow, Flow Distribution, Rectangular Canal.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۵/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۲/۹ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

(۳) استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

(۴) استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

(۵) دانش آموخته سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

مقدمه

از دیرباز، استفاده و انتقال آب‌های سطحی و زیرزمینی برای آبیاری و تأمین آب، نقشی حیاتی در توسعه جوامع داشته است. با کاهش منابع آب و افزایش تقاضا، اندازه‌گیری دقیق جریان و کنترل سطح آب در سامانه‌های آبیاری و زهکشی اهمیت فزاینده‌ای یافته است. پایش منظم مصرف آب و مدیریت بهینه آن، به ویژه در شبکه‌های توزیع آب، عاملی کلیدی در مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود. سازه‌های کنترل جریان، از جمله دریچه‌های کشویی و شعاعی، نقش اساسی در این فرایند ایفا می‌کنند. این دریچه‌ها با ایجاد رابطه‌ای پایدار بین عمق و دبی جریان، امکان تنظیم دقیق سطح آب، اندازه‌گیری جریان و افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی در شبکه‌های آبیاری را فراهم می‌آورند. دریچه‌های کشویی به دلیل طراحی ساده و کارایی بالا، به ویژه در کانال‌های بزرگ، کاربرد گسترده‌ای دارند؛ اما مشکلاتی از قبیل وزن زیاد و اصطکاک در کانال‌های کوچک، عملکرد آن‌ها را محدود می‌کند. در مقابل، دریچه‌های شعاعی با کاهش برخی مشکلات مکانیکی گزینه‌ای مناسب‌تر هستند، اگر چه هزینه ساخت و نگهداری بالاتری دارند. انتخاب نوع دریچه بسته به نیاز پروژه و ملاحظات اقتصادی انجام می‌شود. مطالعات گسترده‌ای توسط پژوهشگران مختلف از جمله هنری [1]، بنجامین [2]، راجاراتنام و سوبرامانیا [3]، سوامی [4]، واندن‌بروک [5]، راث و هاگر [6]، فرو [7]، کیم [8]، لوزانو و همکاران [9]، بلود و همکاران [10]، حبیب‌زاده و همکاران [11] و بیجن‌خان و کوچک‌زاده [12] انجام گرفته است. به عنوان مثال، هنری [1] به بررسی توزیع جریان در پایین‌دست دریچه کشویی در شرایط فشار هیدرواستاتیکی پرداخت و معادله‌ای برای ارتباط ضریب دبی و عمق جریان بالادست ارائه کرد. همچنین، راجاراتنام و سوبرامانیا [3] با استفاده از معادلات انرژی و مومنتوم، روابطی برای محاسبه ضریب دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق توسعه دادند. سوامی [4] نمودارهای هنری را با استفاده از رگرسیون غیرخطی به معادلات کاربردی تبدیل کرد که باعث سهولت در تنظیم جریان و برآورد دبی در کانال‌ها شد. کیم [8] و بنجامین [2] به کمک حل عددی معادلات ناویر-استوکس و تحلیل تابع پتانسیل مختلط، رفتار جریان و ضریب تراکم‌پذیری را در مجاورت دریچه‌ها بررسی کردند. مطالعات بلود و همکاران [10] نیز با به‌کارگیری معادلات انرژی و مومنتوم، تغییرات ضریب دبی

را در حضور پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق تحلیل کردند. با این وجود، مشکلات عملی دریچه‌های کشویی همچون نیروی زیاد لازم برای غلبه بر وزن و اصطکاک در باز و بسته شدن، به خصوص در کانال‌های فرعی، عملکرد آن‌ها را محدود ساخته است؛ بنابراین، دریچه‌های شعاعی به عنوان جایگزینی مطرح شده‌اند. با وجود مزایای دریچه‌های شعاعی، چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالای ساخت، نصب و نگهداری نیز وجود دارد. بیجن‌خان و همکاران [13] با استفاده از تحلیل ابعادی و توسعه روش فرو، دریچه‌های شعاعی را در شرایط جریان آزاد و مستغرق کالبره کرده و روابط بی‌بعد مختلفی را ارائه کردند. همچنین، سلماسی و آبراهام [14] تأثیر زاویه را بر ضریب دبی دریچه‌های کشویی مایل بررسی کردند و نشان دادند که افزایش زاویه مایل، با ایجاد همگرایی جریان، ضریب دبی و ظرفیت جریان را افزایش می‌دهد. خلیلی‌شایان و همکاران [15] روش‌های دقیقی برای تخمین بازشدگی دریچه‌های کشویی و شعاعی ارائه کردند که خطای نسبی را تا حدود ۳ درصد کاهش داد. آن‌ها ضریب انرژی دریچه را نیز معرفی کردند. منگ و همکاران [16] دریچه‌های کشویی دوزنقه‌ای را در کانال‌هایی با شیب جانبی متفاوت بررسی کردند و تأثیر مقیاس بر رژیم جریان و نرخ دبی را مورد مطالعه قرار دادند. هاشم و همکاران [17] نیز با انجام حدود ۲۰۰ آزمایش روی دریچه‌های مثلی، دریافتند که طرح و زاویه داخلی دریچه‌ها تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد و افزایش ضریب دبی دارند. در این میان، دریچه دوار سازه جدیدی است که توسط مرعشی و همکاران [18] و به منظور کنترل تراز سطح آب در بالادست طراحی شده است (شکل ۱). این دریچه‌ها دارای مزایای مهمی چون چرخش حول محور عمودی، نیاز به نیروی اندک برای باز و بسته شدن، زمان کوتاه تغییر وضعیت از حالت باز به بسته، کاهش تجمع رسوبات و مواد شناور، عدم نیاز به آب‌بندی هنگام عملکرد و قابلیت استفاده در مقاطع هندسی مختلف هستند. طراحی چرخشی این دریچه، که تنها در یک نقطه به بستر کانال متصل است، باعث کاهش اختلال در عبور رسوبات می‌شود. مرعشی و همکاران [19] و [20] مطالعات جامعی بر روی هیدرولیک این دریچه‌ها انجام داده‌اند و پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی، تأثیر زاویه بازشدگی دریچه و عمق جریان را در شرایط جریان آزاد و مستغرق بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین معادلات تجربی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برای برآورد دبی

انجام شده است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهایی مانند زاویه بازشدگی دریچه، طول تبدیل و دبی جریان بر توزیع دبی جریان در دو طرف دریچه و افت انرژی مورد تحلیل قرار گرفته است. هدف اصلی تحقیق، ارزیابی جامع عملکرد این دریچه به عنوان یک سازه دومنظوره برای کنترل سطح آب و اندازه‌گیری جریان است. تا توجه به کاربرد گسترده کانال‌های مستطیلی در شبکه‌های توزیع آب و نیاز حیاتی به اندازه‌گیری دقیق دبی، این پژوهش ضمن بررسی رفتار هیدرولیکی جریان، معادلاتی برای تخمین دبی عبوری از دو سمت دریچه و برآورد افت انرژی آن در شرایط جریان آزاد ارائه می‌دهد.



شکل ۱ دریچه دوار نیم‌دایره‌ای ساخته‌شده توسط مرعشی همکاران [18]

مواد و روش‌ها

تحقیقات آزمایشگاهی در یک کانال (فلوم) مستطیلی با طول ۱۲ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۵ متر انجام شد که با شیب طولی بستر برابر با ۰/۰۰۰۸۸ ساخته شده بود. جریان آب توسط یک پمپ گریز از مرکز تأمین می‌شد که آب را از یک مخزن زیرزمینی به یک مخزن تأمین با تراز ثابت منتقل می‌کرد. دبی جریان ورودی به فلوم با استفاده از یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت ± 0.01 لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شد که در بالادست ورودی کانال نصب شده بود. نمای شماتیکی از کل سامانه گردش آب، شامل محل دریچه دوار و دبی‌سنج، در شکل (۲) ارائه شده است. در انتهای پایین‌دست کانال آزمایشگاهی، یک دریچه لولادار برای تنظیم تراز آب نصب شد. این دریچه شرایط جریان آزاد را در محل دریچه دوار تضمین می‌کرد و اثر شرایط پایین‌دست بر

در شرایط مستغرق توسعه داده‌اند که نشان می‌دهد زاویه بازشدگی و نسبت استغراق تأثیر قابل توجهی بر ضریب دبی دارند. بهترین مقطع برای این دریچه‌ها نیم‌دایره یا نیم‌بیضی است؛ اما با توجه به رایج بودن کانال‌های مستطیلی، ضرورت استفاده از تبدیل تدریجی مستطیلی به نیم‌دایره برای نصب و به‌کارگیری آن‌ها نمایان می‌شود. خیرایی و همکاران [21] به بررسی آزمایشگاهی کاربرد دریچه‌های دوار نیم‌دایره‌ای در کانال‌های مستطیلی پرداختند. آن‌ها برای تبدیل مقطع مستطیلی به نیم‌دایره‌ای از سه تبدیل تدریجی با طول‌های ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه دوار یا کاهش طول تبدیل تدریجی، ضریب دبی دریچه افزایش می‌یابد و بالعکس، با کاهش زاویه بازشدگی دریچه دوار یا افزایش طول تبدیل تدریجی، ضریب دبی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها روابط (۱) و (۴) را برای محاسبه دبی و ضریب دبی دریچه دوار در شرایط جریان آزاد، به ترتیب بر مبنای رابطه دبی - اشل و تحلیل ابعادی، ارائه کردند.

$$Q = \kappa y_1^{\omega} \quad (1)$$

$$\kappa = -0.619 + 1.514\theta - 0.291L_T \quad (2)$$

$$\omega = 1.365 + 0.457\theta - 0.048L_T \quad (3)$$

$$C_{dF} = 0.992\eta(\psi)\eta^{0.571} \quad (R^2=0.98) \quad (4)$$

$$\eta = L_T W_T \theta \quad (5)$$

$$\psi = 4.723e^{-0.903L_T} \quad (R^2=0.99) \quad (6)$$

در این روابط Q دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه، θ زاویه بازشدگی دریچه دوار بر حسب رادیان، L_T طول تبدیل تدریجی بر حسب متر، L_T^* نسبت طول تبدیل تدریجی به عمق جریان در بالادست دریچه و W_T^* نسبت مجموع عرض سطح آب در طرفین دریچه به عمق جریان در بالادست دریچه دوار می‌باشد.

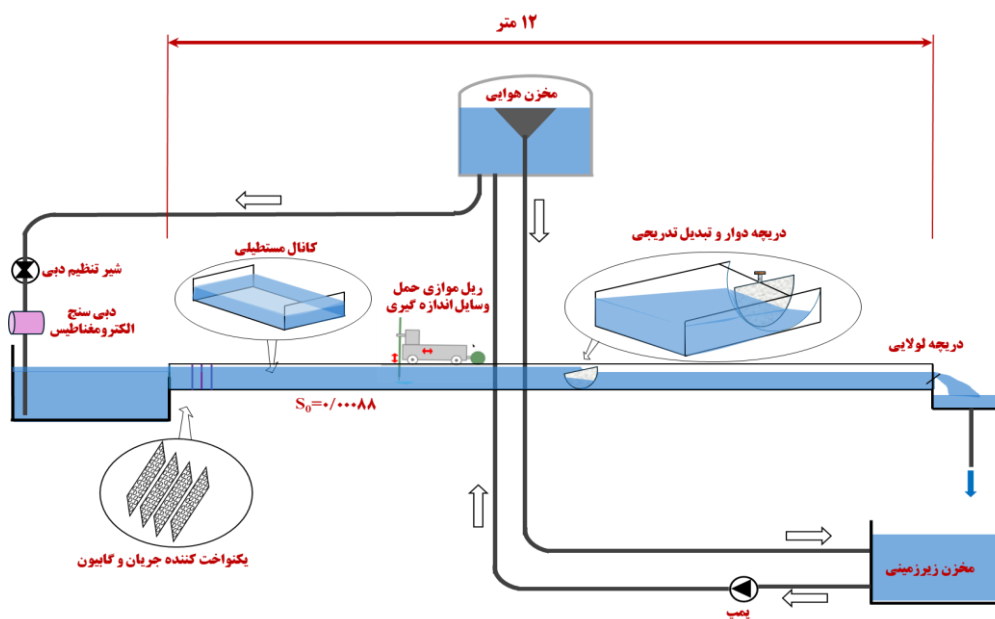
بهترین مقطع برای دریچه‌های دوار، شکل نیم‌دایره یا نیم‌بیضی است؛ اما با توجه به رایج بودن مقطع مستطیلی در کانال‌های انتقال آب، استفاده از تبدیل تدریجی از مقطع مستطیل به نیم‌دایره برای نصب این نوع دریچه‌ها ضرورت می‌یابد. پژوهش حاضر با هدف بررسی رفتار هیدرولیکی دریچه دوار نیم‌دایره‌ای در کانال مستطیلی و با بهره‌گیری از تبدیل تدریجی،

اجزای هندسی و کلیدی دریچه دوار و تبدیل تدریجی در شکل (۴) نمایش داده شده‌اند. برای تنظیم دقیق زاویه بازشدگی دریچه دوار نسبت به محور عرضی کانال، از یک رینگ مدرج استفاده شد.

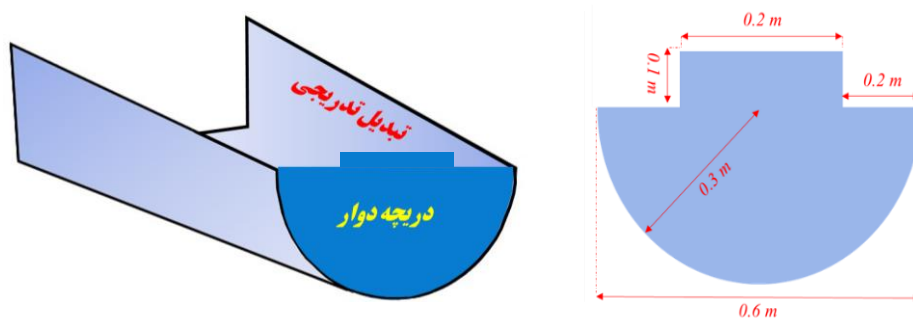
تعداد آزمایش‌ها و محدوده متغیرهای هندسی و هیدرولیکی در جدول (۱) ارائه گردیده است. در ادامه جهت سهولت در ترسیم نمودارها و تحلیل آزمایش‌ها برای هر آزمایش یک نام اختصاری در نظر گرفته می‌شود. این نام‌گذاری آزمایش‌ها به صورت $Q-\theta-L_T-RG$ است که در آن RG مخفف دریچه دوار، L_T طول تبدیل بر حسب متر، θ زاویه بازشدگی دریچه بر حسب درجه و Q دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه است. در این تحقیق زاویه‌های بازشدگی دریچه دوار از ۳۵ تا ۸۵ درجه، با طول گام ۵ درجه تغییر می‌کرد، در حالی که دامنه دبی‌های مورد آزمایش از ۰/۰۲۰ تا ۰/۰۳۸ مترمکعب بر ثانیه، با اختلاف ۰/۰۰۲ متر مکعب بر ثانیه است. در صورتی که دریچه دوار نیم‌دایره‌ای در حالت کاملاً بسته ($\theta=0$) قرار گیرد، انسداد کامل مسیر جریان می‌تواند موجب ایجاد پس‌زدگی شدید، افزایش تراز آب در بالادست و در نهایت سرریز آب از روی دریچه شود. با این حال، این وضعیت خارج از محدوده بهره‌برداری و اهداف طراحی دریچه در پژوهش حاضر است. در این مطالعه، دامنه زاویه‌های بازشدگی دریچه به صورت آگاهانه در بازه ۳۵ تا ۸۵ درجه انتخاب شده است. زاویه‌های کمتر از این مقدار بررسی نشدند، زیرا حتی در حداقل دبی آزمایشگاهی نیز منجر به سرریز و ناپایداری جریان می‌شدند. علاوه بر این، با توجه به عرض کانال مورد آزمایش (۰/۶ متر) حداقل طول تبدیل ۰/۶ متر انتخاب شد تا تبدیل مؤثر و کاربردی از مقطع مستطیلی به نیم‌دایره‌ای امکان‌پذیر گردد.

عملکرد آن را به حداقل می‌رساند. نسبت عمق پایین‌دست به بالادست نیز همواره در محدوده‌ای قرار داشت که نشان‌دهنده عدم استغراق دریچه و حاکمیت جریان آزاد بود. به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در این تحقیق از سرعت‌سنج سه‌بعدی وکترینو پروفایلر استفاده شد و در نقاطی که امکان استفاده از سرعت‌سنج سه‌بعدی وجود نداشت، سرعت جریان با استفاده از دستگاه میکرومولینه اندازه‌گیری گردید.

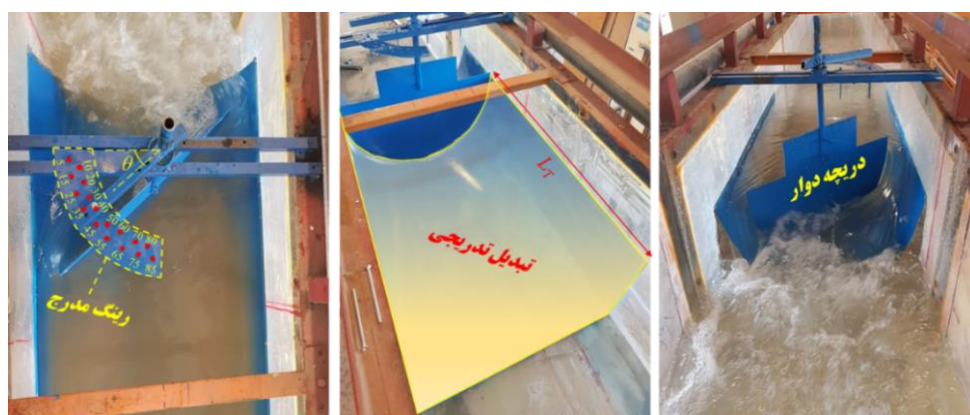
برای تبدیل تدریجی از مقطع مستطیلی به نیم‌دایره، از ورق‌های فولادی گالوانیزه با ضخامت یکنواخت ۰/۰۰۴ متر استفاده شد. تبدیل‌ها در سه طول مختلف ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. طراحی و ساخت یک تبدیل تدریجی، هموار و پیوسته از مقطع مستطیلی به نیم‌دایره‌ای فرایندی چالش‌برانگیز است. از این رو، در پژوهش حاضر عملیات ساخت با دقت بالا و در چند مرحله انجام شد تا از بروز ناپیوستگی هندسی و ناپایداری جریان جلوگیری شود. استفاده از ورق‌های فولادی گالوانیزه با ضخامت یکنواخت ۰/۰۰۴ متر این امکان را فراهم کرد که ضمن حفظ شکل هندسی مطلوب، خم‌کاری با دقت بالا انجام شود و سطح داخلی صاف و یکنواختی ایجاد گردد. در هر سه تبدیل، تغییر شکل مقطع از مستطیل به نیم‌دایره به صورت پیوسته و تدریجی در طول مسیر تبدیل انجام شد. انتخاب سه طول متفاوت این امکان را فراهم ساخت تا اثر طول تبدیل بر رفتار هیدرولیکی جریان بررسی شود. بخش بالادست هر تبدیل به کف و دیواره‌های کانال مستطیلی متصل گردید و بخش پایین‌دست آن به قاب فلزی نیم‌دایره‌ای با قطر ۰/۶ متر (که محل نصب دریچه دوار بود) اتصال یافت. این قاب به عنوان مرجع هندسی ثابت عمل کرده و پیوستگی کامل میان تبدیل و دریچه را تضمین می‌کرد. به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان (بر اساس آزمایش‌های مقدماتی)، مجموعه تبدیل تدریجی و دریچه دوار در فاصله ۶ متری از ابتدای کانال نصب شد. همچنین از محور دریچه تا فاصله ۰/۳ متری در پایین‌دست (معادل شعاع دریچه دوار)، مقطع کانال به صورت نیم‌دایره‌ای در نظر گرفته شد. شماتیکی از دریچه دوار، ابعاد آن و تبدیل تدریجی در شکل (۳) ارائه شده است. دریچه دوار نیم‌دایره‌ای نیز از ورقه آهنی با ضخامت ۲ میلی‌متر برش داده شد.



شکل ۲ نمای کلی از کانال آزمایشگاهی و سامانه گردش آب



شکل ۳ نمای کلی از تبدیل تدریجی و دریچه دوار و ابعاد آن



شکل ۴ بخش‌های مختلف مدل فیزیکی

جدول ۱ محدوده متغیرهای هندسی و هیدرولیکی در این تحقیق

نام آزمایش‌ها	تعداد آزمایش‌ها	محدوده عدد فرود در بالادست دریچه	محدوده عمق جریان بالادست (متر)	محدوده دبی (متر مکعب بر ثانیه)	زاویه بازشدگی دریچه (متر)	طول تبدیل (متر)
RG-0.6-θ-Q	6	0.099-0.103	0.226-0.288	0.020-0.030	35	0.6
	8	0.111-0.117	0.210-0.288	0.020-0.034	40	
	10	0.134-0.146	0.185-0.268	0.020-0.038	45	
	10	0.149-0.164	0.172-0.248		50	
	10	0.174-0.190	0.155-0.225		55	
	10	0.193-0.215	0.145-0.207		60	
	10	0.217-0.242	0.134-0.191		65	
	10	0.235-0.267	0.127-0.179		70	
	10	0.247-0.291	0.123-0.169		75	
	10	0.256-0.310	0.120-0.162		80	
	10	0.266-0.319	0.117-0.159		85	
RG-0.9-θ-Q	4	0.091-0.093	0.239-0.281	0.020-0.026	35	0.9
	6	0.102-0.106	0.221-0.257	0.020-0.030	40	
	10	0.124-0.132	0.195-0.287	0.020-0.038	45	
	10	0.141-0.149	0.179-0.264		50	
	10	0.163-0.171	0.162-0.238		55	
	10	0.183-0.195	0.152-0.221		60	
	10	0.215-0.223	0.135-0.202		65	
	10	0.232-0.250	0.128-0.187		70	
	10	0.238-0.274	0.126-0.176		75	
	10	0.253-0.289	0.121-0.170		80	
	10	0.256-0.299	0.120-0.166		85	
RG-1.2-θ-Q	4	0.083-0.085	0.254-0.298	0.020-0.026	35	1.2
	6	0.095-0.097	0.233-0.300	0.020-0.030	40	
	10	0.116-0.128	0.203-0.292	0.020-0.038	45	
	10	0.130-0.143	0.189-0.271		50	
	10	0.151-0.168	0.171-0.244		55	
	10	0.166-0.188	0.160-0.226		60	
	10	0.191-0.218	0.146-0.205		65	
	10	0.208-0.239	0.138-0.193		70	
	10	0.227-0.263	0.130-0.181		75	
	10	0.241-0.281	0.125-0.173		80	
	10	0.250-0.294	0.129-0.168		85	

نتایج و بحث

تغییرات سطح مقطع جریان در دو طرف دریچه

پس از ورود جریان به کانال مستطیلی، جریان به سمت دریچه حرکت می‌کند و با برخورد به لبه دریچه به دو قسمت تقسیم می‌شود. این تقسیم، علاوه بر ایجاد دو سطح مقطع جریان در طرفین دریچه، دو عرض سطح آب به نام‌های W_R در سمت راست و W_L در سمت چپ ایجاد می‌کند. در شکل (۵)، نحوه

تقسیم جریان بین طرفین دریچه در اثر برخورد آب با لبه آن نمایش داده شده است. شکل (۶) سطح مقطع چپ و راست دریچه را برای سه تبدیل تدریجی و زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، شکل سطح مقطع سمت راست در مرز تبدیل نیم‌دایره‌ای ثابت است، در حالی که در مقطع سمت چپ، مرز تبدیل تدریجی در زاویه‌های مختلف، متفاوت است.

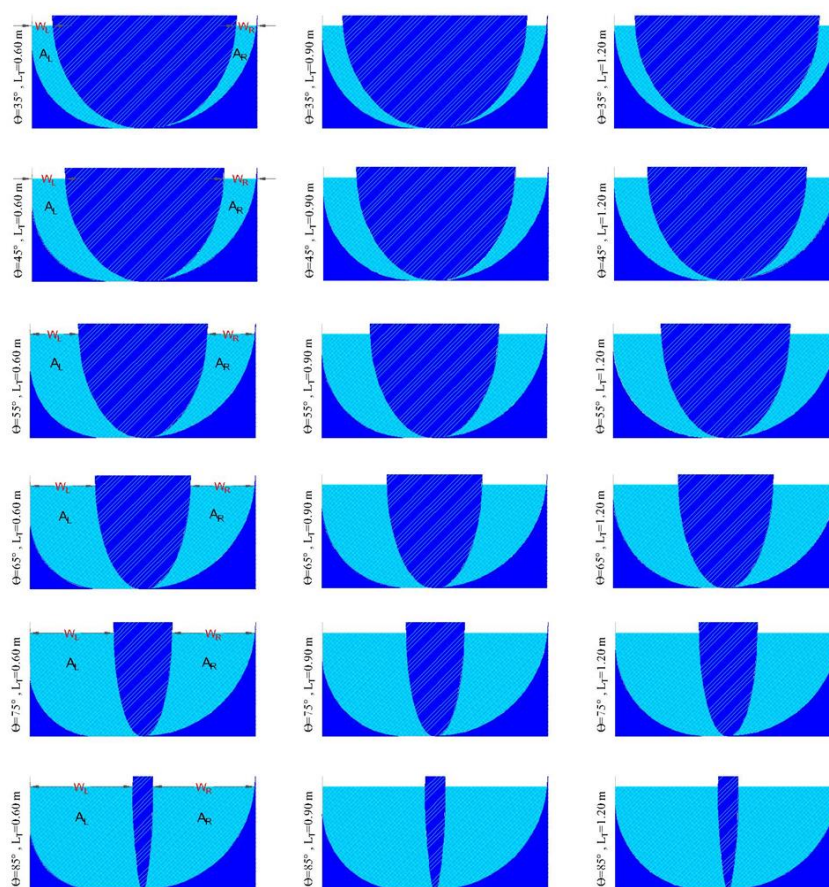
مقطع سمت راست ندارد و تغییرات فقط به واسطه تغییر زاویه بازشدگی دریچه رخ می‌دهد. در این تحقیق، دوران دریچه به صورت پادساعتگرد تعریف شده است، به طوری که مقطع سمت راست دریچه همیشه بر روی قسمت نیم‌دایره‌ای تبدیل (به طول ۰/۳ متر از محور دریچه به سمت پایین‌دست) قرار می‌گیرد. مرکز تبدیل که در تماس با آب است، در تمامی زاویه‌ها ثابت و به شکل نیم‌دایره باقی می‌ماند. اما در مقطع سمت چپ، نیمی از دریچه بر روی تبدیل تدریجی قرار گرفته و مرکز آن بسته به طول تبدیل و زاویه بازشدگی تغییر می‌کند. در شکل (۸) تغییرات سطح مقطع سمت چپ دریچه را نسبت به عمق جریان برای سه طول تبدیل ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با فرض ثابت بودن عمق، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، سطح مقطع سمت چپ در تمامی تبدیل‌ها افزایش می‌یابد.

با ثابت بودن عمق و زاویه بازشدگی، بیشترین سطح مقطع سمت چپ به تبدیل تدریجی با طول ۰/۶ متر و کمترین آن به طول ۱/۲ متر مربوط می‌شود.

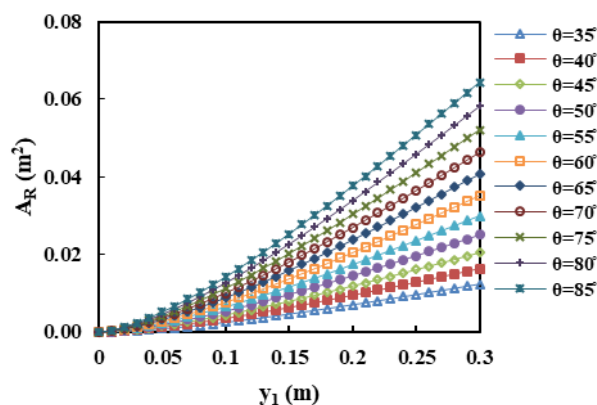


شکل ۵ نحوه تقسیم جریان بین طرفین دریچه‌وار

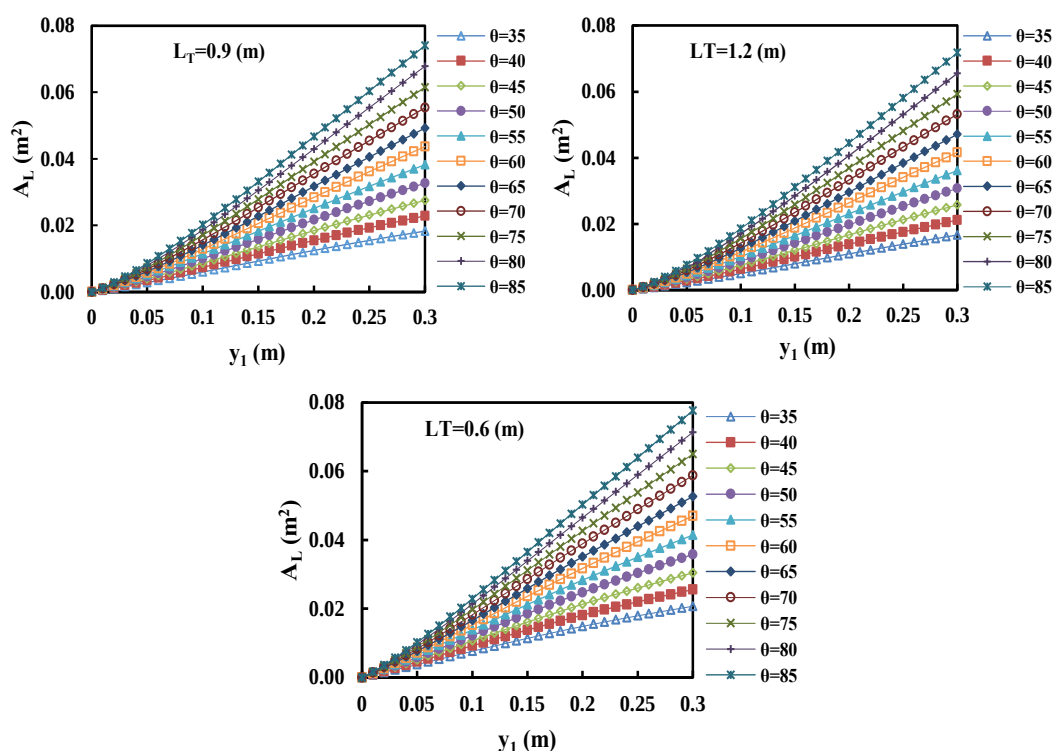
مساحت‌های سمت چپ و راست با استفاده از نرم‌افزار اتوکد محاسبه شده است. تغییرات سطح مقطع سمت راست دریچه نسبت به عمق جریان برای زاویه‌های مختلف بازشدگی در شکل (۷) ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که با فرض ثابت بودن عمق جریان، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، سطح مقطع جریان افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به اینکه سطح مقطع سمت راست دریچه بر روی تبدیل نیم‌دایره‌ای ثابت قرار دارد، تغییر طول تبدیل تدریجی بالادست دریچه تأثیری بر سطح



شکل ۶ وضعیت بازشدگی سمت راست و چپ دریچه در تبدیل‌ها و زاویه‌های مختلف



شکل ۷ تغییرات سطح مقطع سمت راست دریچه نسبت به عمق جریان



شکل ۸ تغییرات سطح مقطع چپ دریچه با عمق جریان در طول تبدیل‌های مختلف

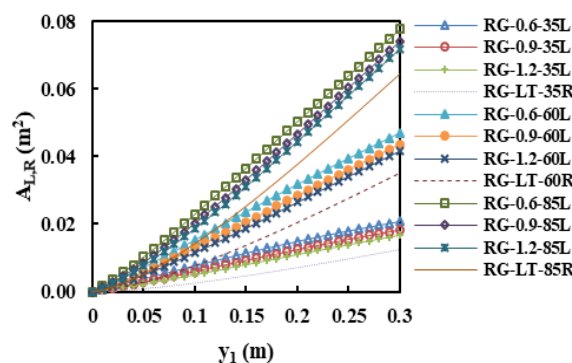
دوار ($A_w = A_R + A_L$) را در برابر دبی جریان در زاویه بازشدگی ۶۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار مشخص است در شرایط هیدرولیکی و هندسی یکسان (دبی و زاویه بازشدگی ثابت) بیشترین سطح مقطع جریان خروجی از دریچه دوار مربوط به تبدیل تدریجی با طول ۰/۶ متر و کمترین سطح مقطع جریان خروجی از دریچه دوار مربوط به تبدیل تدریجی با طول ۱/۲ متر است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با فرض ثابت بودن زاویه بازشدگی، سطح مقطع سمت راست دریچه کمتر از سطح مقطع سمت چپ است. همچنین، طول تبدیل تدریجی تأثیری بر سطح مقطع سمت راست ندارد و این سطح مقطع فقط به زاویه بازشدگی و عمق جریان وابسته است. در مقابل، سطح مقطع سمت چپ علاوه بر این دو عامل، به طول تبدیل تدریجی نیز وابسته است (شکل ۹).

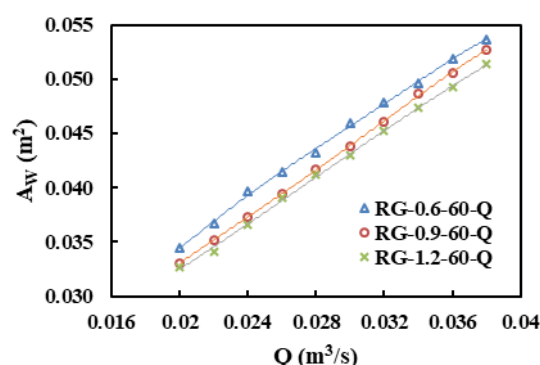
شکل (۱۰) تغییرات سطح مقطع جریان خروجی از دریچه

حداکثر طول برداشت پروفیل (۷ متر) و محور y (عمق جریان) نسبت به حداکثر عمق جریان (۰/۳۰ متر) بی‌بعد گردید به عبارت دیگر برای ترسیم پروفیل‌های سطح آب از طول نسبی و عمق نسبی استفاده گردید. شکل (۱۲) تغییرات عرضی پروفیل سطح آب را برای زاویه‌های مختلف بازشدگی دریاچه دوار برای حداکثر دبی عبوری از تبدیل تدریجی به طول ۰/۹ متر نشان می‌دهند. در این تبدیل، حداکثر دبی عبوری از دریاچه برای زاویه‌های ۳۵ و ۴۰ درجه، ۰/۰۲۶ متر مکعب بر ثانیه و برای سایر زاویه (۴۵ تا ۸۵ درجه) ۰/۰۳۸ متر مکعب بر ثانیه است. همان طور که از پروفیل‌های ترسیم شده مشخص است با افزایش زاویه بازشدگی دریاچه دوار به تدریج تغییرات عرضی پروفیل سطح آب کاهش می‌یابد به عبارتی بیشترین تغییرات عرضی پروفیل سطح آب مربوط به زاویه بازشدگی ۳۵ درجه و کمترین تغییرات عرضی پروفیل سطح آب مربوط به زاویه ۸۵ درجه است. برداشت عمق آب در پایین‌دست دریاچه دوار، با وجود آشفتگی‌های شدید جریان، با دقت کافی انجام شد. نقاط اندازه‌گیری در نواحی با آشفتگی کمتر انتخاب شدند و عمق پایین‌دست در سه نوبت اندازه‌گیری گردید. در نهایت، میانگین این سه مقدار به عنوان عمق پایین‌دست در نظر گرفته شد.

با افزایش زاویه بازشدگی دریاچه، سطح مقطع جریان در دو سمت آن افزایش می‌یابد و برای یک دبی ثابت، عمق جریان در طرفین دریاچه متفاوت می‌شود؛ به گونه‌ای که بیشترین تغییرات در زاویه ۳۵ درجه و کمترین آن در زاویه ۸۵ درجه مشاهده شد. از این رو، یک دبی مشخص می‌تواند در زاویه‌های مختلف عمق‌های متفاوتی ایجاد کند. برای کنترل این مسئله، سه اقدام انجام شد: استفاده از تبدیل تدریجی از مقطع مستطیلی به نیم‌دایره‌ای با طول‌های ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر به منظور کاهش اختلاف عمق؛ تنظیم زاویه بازشدگی دریاچه که نشان داد زاویه حدود ۸۵ درجه یکنواختی بیشتری ایجاد می‌کند؛ و محاسبه دبی عبوری از دو سمت دریاچه با سرعت‌سنج سه‌بعدی برای تنظیم دقیق زاویه و کاهش نوسانات عمق. در مجموع، با انتخاب مناسب زاویه و طول تبدیل، عدم یکنواختی عمق برای یک دبی معین قابل کنترل است.



شکل ۹ مقایسه سطح مقطع سمت چپ و راست دریاچه در تبدیل‌های تدریجی مختلف

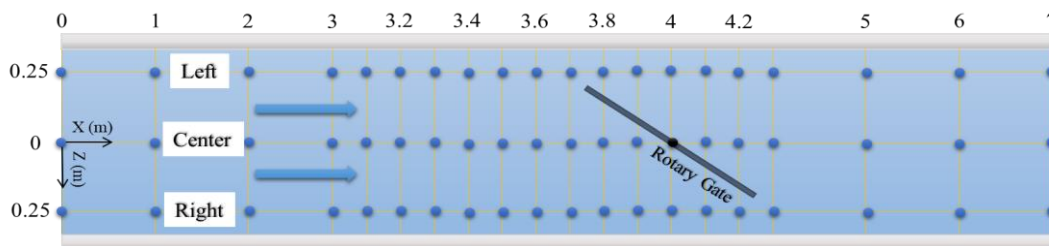


شکل ۱۰ تغییرات سطح مقطع جریان خروجی از دریاچه دوار با دبی جریان برای زاویه بازشدگی 60 درجه

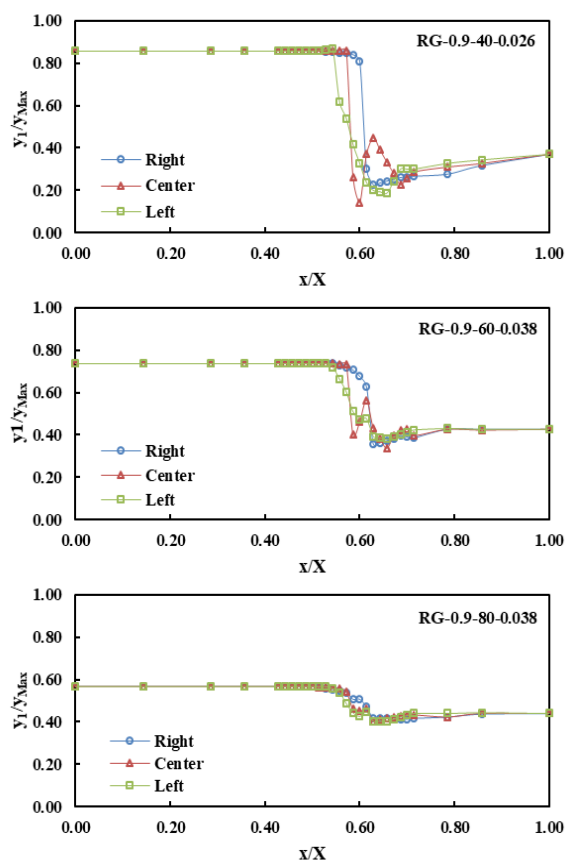
تغییرات عرضی پروفیل سطح آب

به منظور بررسی پروفیل سطح آب در این تحقیق، پروفیل سطح آب در طول ۷ متر و از فاصله ۴ متری بالادست محور دریاچه تا فاصله ۳ متری پایین‌دست دریاچه برداشت گردید. همچنین به منظور بررسی تغییرات عرضی پروفیل سطح آب در سه نقطه در عرض کانال شامل پروفیل سطح آب در مرکز کانال، پروفیل سطح آب در راستای مقطع سمت چپ دریاچه و پروفیل سطح آب در راستای مقطع سمت راست دریاچه برداشت گردید. شکل (۱۱) نقاط اندازه‌گیری عمق جریان را در راستای طولی و عرضی کانال آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

به منظور ترسیم بهتر پروفیل‌های سطح آب و نشان دادن مناسب‌تر تغییرات عمق جریان، در این تحقیق برای ترسیم پروفیل‌های سطح آب محور x (راستای طولی کانال) نسبت به



شکل ۱۱ محل‌های اندازه‌گیری عمق جریان در راستای عرضی و طولی کانال آزمایشگاهی



شکل ۱۲ تغییرات عرضی پروفیل سطح آب در زاویه بازشدگی مختلف

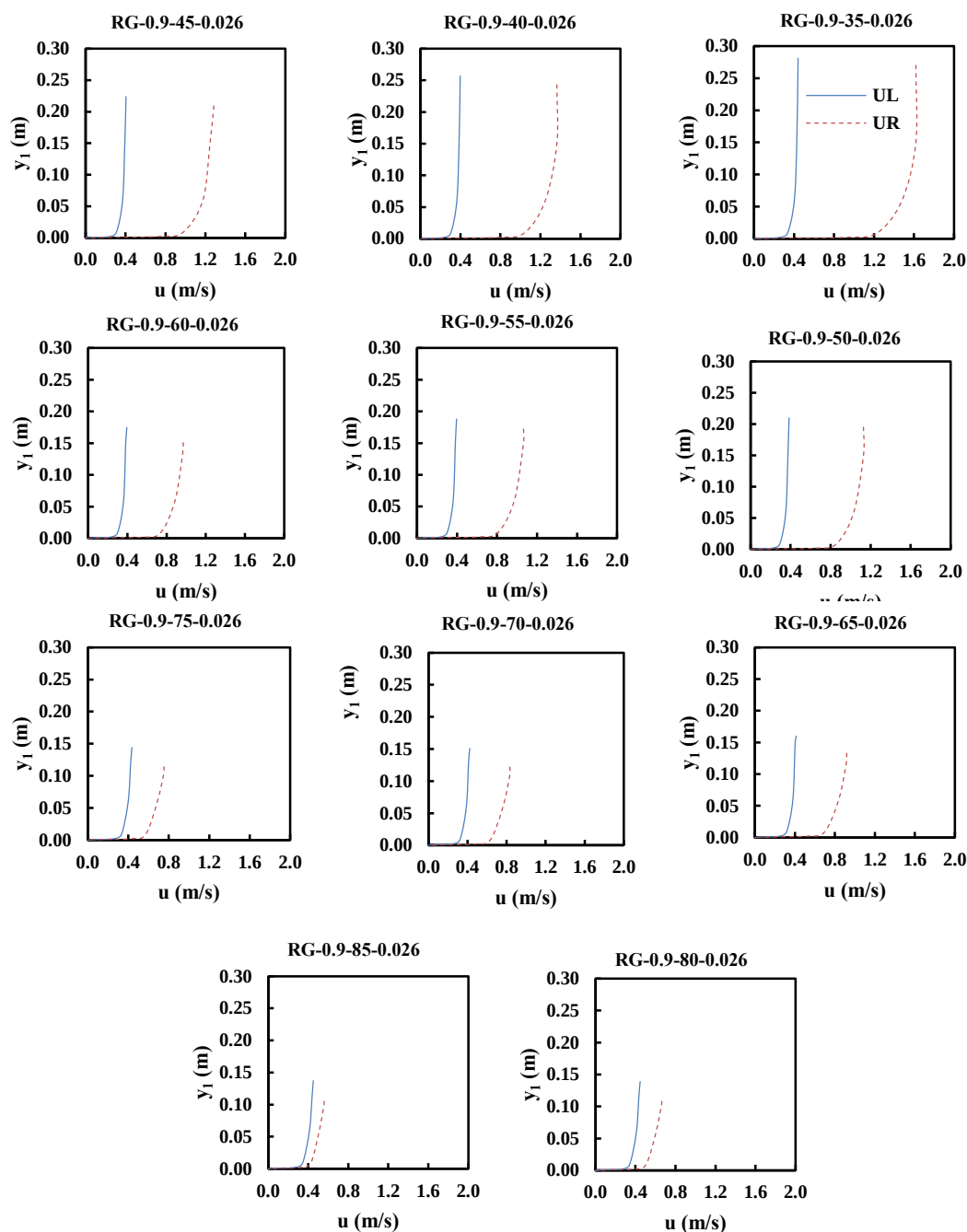
توزیع سرعت جریان در طرفین دریچه

در شکل (۱۳) توزیع عمقی سرعت جریان در محل مقاطع سمت راست و چپ دریچه دوار در تبدیل ۰/۹ متر نشان داده شده است. همان‌طور که از این نمودارها مشخص است، سرعت جریان در مقطع سمت راست دریچه به مراتب بیشتر از سرعت جریان عبوری از مقطع سمت چپ دریچه است. با مقایسه شکل‌های مذکور می‌توان دریافت که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه سرعت در مقطع سمت راست کاهش و در نتیجه دبی عبوری از مقطع سمت راست کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که، بعد از ورود جریان به کانال جریان به سمت پایین‌دست حرکت

می‌کند و به لبه دریچه دوار برخورد می‌کند و بخش عمده‌ای از دبی جریان از مجرای سمت راست عبور می‌کند. در اثر وجود دریچه دوار خطوط جریان در سمت راست دریچه فشرده می‌شود (شکل ۵)، عمق جریان و سطح مقطع جریان به تدریج در طول مجرای سمت راست دریچه کاهش و سرعت جریان در طول مسیری از ابتدای دریچه تا محل مقطع سمت راست دریچه افزایش می‌یابد. برعکس بخش کمتری از دبی جریان در اثر برخورد جریان به لبه دریچه و موقعیت هندسی دریچه از مقطع سمت چپ دریچه عبور می‌کند و با توجه به اینکه هیچ‌گونه فشردگی در خطوط جریان در محل مقطع سمت چپ دریچه

افزایش دبی عبوری از مقطع سمت چپ دریاچه در اثر افزایش زاویه بازشدگی دریاچه، افزایش مساحت مقطع جریان با توجه به معادله پیوستگی است. به عبارت دیگر با توجه به معادله پیوستگی، در مقطع سمت چپ دریاچه سرعت ثابت است و دلیل افزایش دبی عبوری از این قسمت، افزایش زاویه بازشدگی دریاچه، افزایش سطح مقطع جریان می‌باشد.

ایجاد نمی‌شود سرعت جریان در مقطع سمت چپ به مراتب کمتر از سرعت جریان در مقطع سمت راست است. همچنین بررسی داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد تغییر زاویه بازشدگی دریاچه تأثیر ناچیزی بر سرعت جریان مقطع سمت چپ دریاچه دارد. به عبارت دیگر سرعت جریان در مقطع سمت چپ دریاچه تحت تأثیر تغییر زاویه بازشدگی دریاچه نیست و دلیل



شکل ۱۳ تغییرات عمقی سرعت در مقاطع سمت راست و چپ دریاچه دوار برای تبدیل تدریجی با طول ۹/۰ متر

تقسیم دبی بین دو طرف دریچه دوار

به منظور بررسی تقسیم دبی دو طرف دریچه دوار و تأثیر پارامترهای هندسی مختلف بر روی میزان دبی عبوری از مقاطع سمت راست و چپ دریچه مراحل زیر به ترتیب انجام شد:

مساحت مقاطع جریان در سمت چپ و راست دریچه برای زاویه‌ها، تبدیل‌ها و دبی‌های مختلف محاسبه شد.

با استفاده از سرعت سنج سه‌بعدی و کترینو پروفایلر سرعت جریان در فواصل عرضی ۰/۳ متری و عمقی ۰/۰۱ متری با فرکانس ۲۰ هرتز و به مدت یک دقیقه (در هر نقطه ۱۲۰۰ داده سرعت) در مقاطع سمت چپ و راست دریچه برداشت گردید. سرعت متوسط در مقاطع سمت چپ و راست دریچه از با استفاده از داده‌های سرعت ثبت‌شده توسط سرعت‌سنج سه‌بعدی برای زاویه‌ها، تبدیل‌ها و دبی‌های مختلف محاسبه گردید.

با مشخص شدن مساحت مقاطع جریان سمت چپ و راست دریچه و مشخص شدن سرعت جریان در این مقاطع دبی جریان عبوری از سمت چپ (Q_L) و راست (Q_R) دریچه در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی محاسبه گردید.

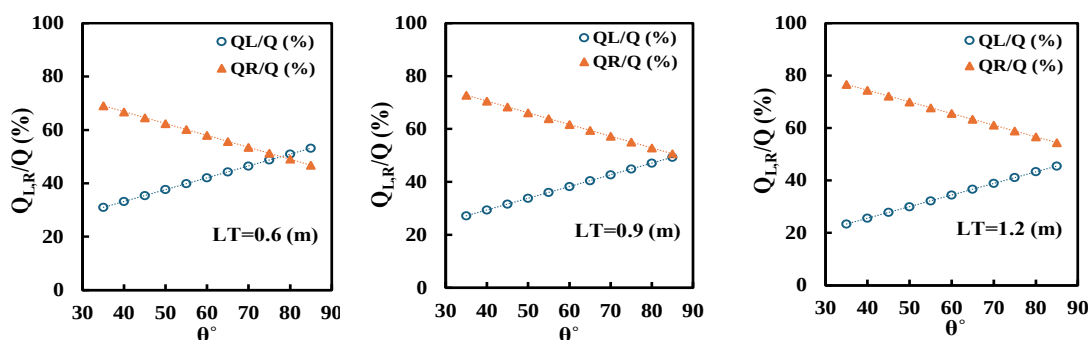
با استفاده از دبی جریان اندازه‌گیری‌شده توسط دبی‌سنج الکترومغناطیسی در آزمایشگاه و دبی جریان سمت راست و چپ دریچه با در دست داشتن داده‌های سرعت و سطح مقطع طرفین دریچه و استفاده از رابطه پیوستگی محاسبه‌شده و در نهایت روابط (۷) و (۸) به ترتیب برای محاسبه نسبت دبی سمت چپ و راست دریچه به دبی کل استخراج گردید.

$$\frac{Q_R}{Q} = (0.769 - 0.254\theta + 0.076 \frac{L_T}{B}) \times 100 \quad (7)$$

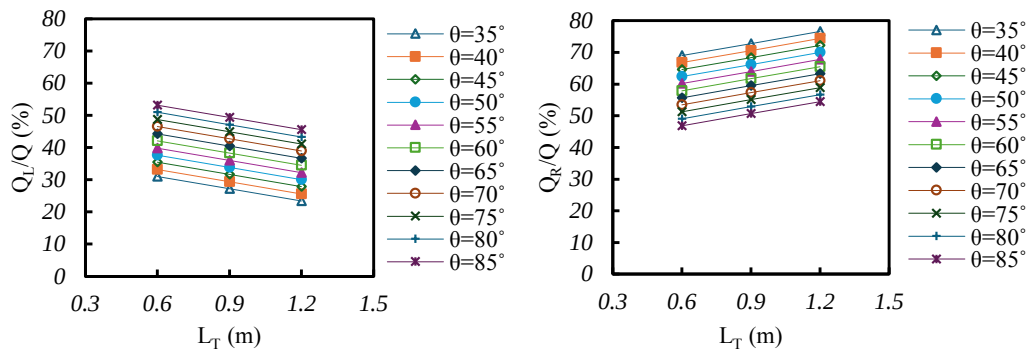
$$\frac{Q_L}{Q} = (0.231 + 0.254\theta - 0.076 \frac{L_T}{B}) \times 100 \quad (8)$$

در این روابط زاویه بازشدگی (θ) بر حسب رادیان، طول

تبدیل (L_T) بر حسب متر، عرض کانال (B) بر حسب متر و نسبت‌های دبی بر حسب درصد است. شکل (۱۴) تغییرات درصد دبی عبوری از مقاطع سمت چپ و راست دریچه دوار را در مقابل تغییر زاویه بازشدگی دریچه دوار نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل نیز مشخص است، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه دبی عبوری از سمت چپ دریچه افزایش و دبی عبوری از سمت راست دریچه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش زاویه بازشدگی دریچه درصد دبی عبوری از سمت چپ دریچه افزایش و برعکس با کاهش زاویه بازشدگی دریچه درصد دبی عبوری از سمت راست دریچه افزایش می‌یابد. همچنین به منظور بررسی تأثیر تغییر طول تبدیل تدریجی بر درصد دبی عبوری از مقاطع سمت چپ و راست دریچه شکل (۱۵) ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که به ازای یک زاویه بازشدگی ثابت و با افزایش طول تبدیل تدریجی، میزان جریان عبوری از مقطع سمت چپ کاهش و جریان عبوری از مقطع سمت راست افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان دریافت با افزایش زاویه بازشدگی دریچه و یا کاهش طول تبدیل تدریجی درصد دبی عبوری از مقطع سمت چپ دریچه افزایش و برعکس با کاهش زاویه بازشدگی دریچه و یا افزایش طول تبدیل تدریجی درصد دبی عبوری از مقطع سمت راست دریچه افزایش می‌یابد. دبی کل عبوری از دریچه حاصل جمع دبی عبوری از سمت راست و چپ است و بنابراین دبی کل و دبی هر سمت دارای رابطه مستقیم و تقریباً خطی با یکدیگر هستند. همان‌طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، دبی عبوری از سمت چپ دریچه افزایش می‌یابد و به همان مقدار دبی عبوری از سمت راست کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، تغییرات دبی دو سمت به صورت معکوس و برابر هم بوده و حاصل جمع آن‌ها همواره برابر دبی کل است.



شکل ۱۴ نمودار تغییرات درصد دبی عبوری از طرفین دریچه در اثر تغییر زاویه بازشدگی دریچه



شکل ۱۵ نمودار تغییرات درصد دبی عبوری از طرفین دریچه در اثر تغییر طول تبدیل تدریجی

انرژی نسبی تغییر ناچیزی دارد که نشان‌دهنده استقلال تقریباً کامل آن از دبی و حساسیت کمتر به آن است؛ به طوری که افت انرژی نسبی بیشتر تحت تأثیر تغییرات عمق جریان قرار دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که زاویه بازشدگی دریچه و طول تبدیل به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل مؤثر بر اتلاف انرژی هستند. با تعریف نسبت عمق جریان پایین‌دست به عمق بالادست دریچه $(\xi = y_2/y_1)$ و صرف نظر از هد سرعت در بالادست و پایین‌دست $(u^2/2g)$ به دلیل کوچک بودن آن (با توجه به سرعت‌های متوسط اندازه‌گیری شده و عمق جریان‌ها، تخمین‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که خطای ناشی از حذف هد سرعت کمتر از ۱ تا ۲ درصد است)، می‌توان تلفات نسبی انرژی را به شرح زیر نوشت:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{(y_1 - y_2)}{y_1} = 1 - \xi \quad (10)$$

تغییرات ξ در برابر زاویه بازشدگی دریچه در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، ضریب ξ افزایش می‌یابد (افت انرژی نسبی کاهش می‌یابد). همچنین این شکل نشان می‌دهد که تأثیر تغییر زاویه بازشدگی دریچه بر روی ضریب ξ بسیار بیشتر از تأثیر تغییر طول تبدیل تدریجی بر ضریب ξ و تلفات نسبی انرژی است. رابطه (۱۱) برای محاسبه ضریب ξ ارائه شده است.

$$\xi = 0.090 + 0.5130 - 0.010 \frac{L_T}{B} \quad 35^\circ \leq \theta \leq 85^\circ \quad (11)$$

در این رابطه زاویه بازشدگی (θ) بر حسب رادیان و طول تبدیل (L_T) و عرض کانال (B) بر حسب متر هستند. این رابطه نشان می‌دهد که افت انرژی نسبی دریچه دوار تحت شرایط جریان آزاد به طور قابل توجهی تحت تأثیر زاویه بازشدگی دریچه دوار می‌باشد (شکل ۱۹).

افت انرژی دریچه دوار

افت انرژی ناشی از نصب دریچه دوار و تبدیل تدریجی مقطع مستطیلی به نیم‌دایره با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

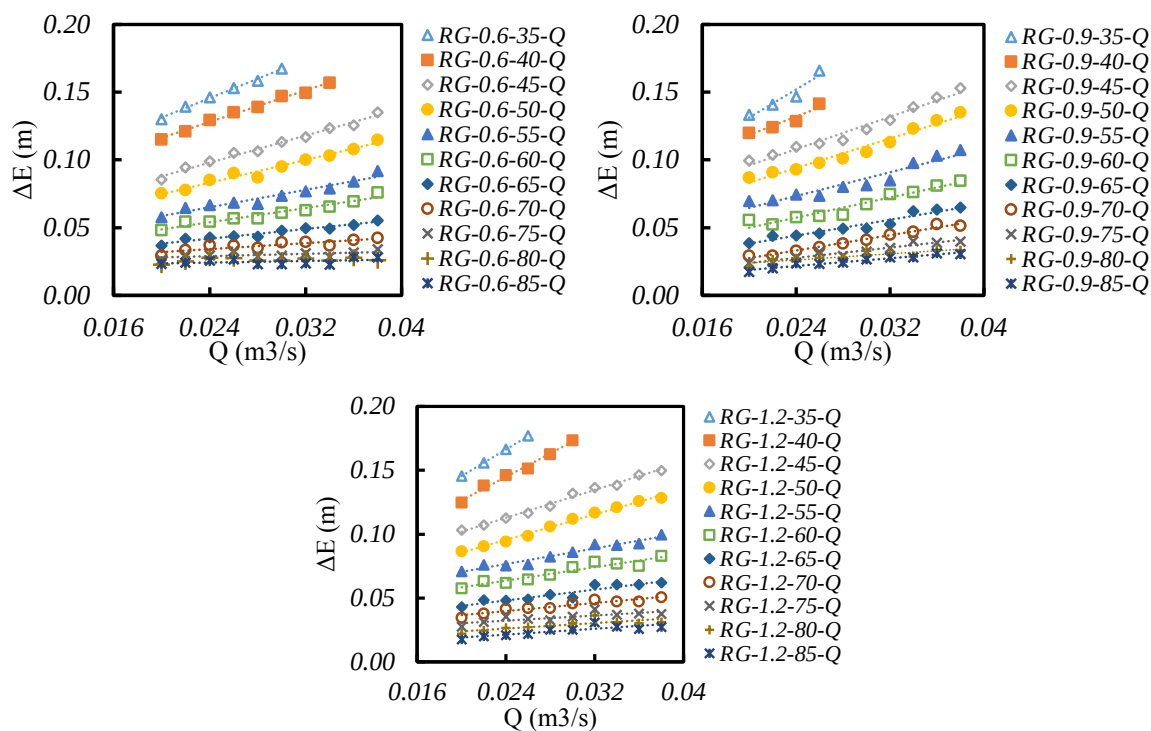
$$\Delta E = E_1 - E_2 = (y_1 + \frac{u_1^2}{2g}) - (y_2 + \frac{u_2^2}{2g}) \quad (9)$$

در این رابطه u_1 و u_2 به ترتیب سرعت متوسط در بالادست

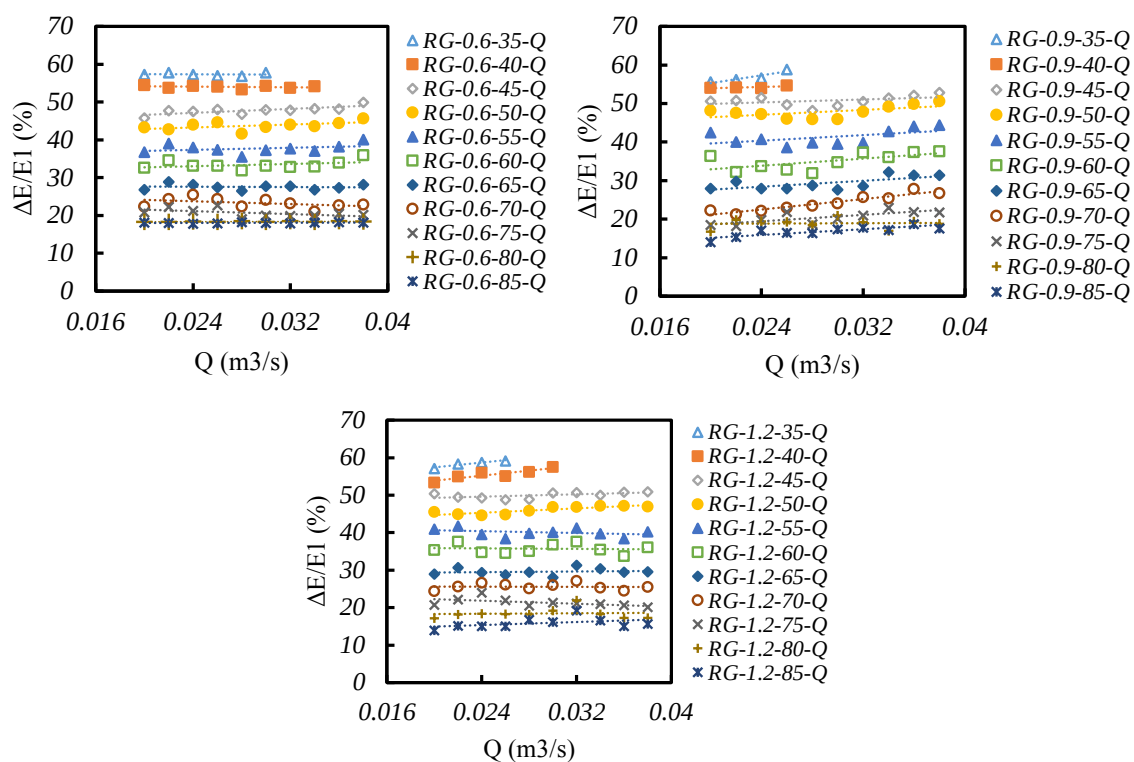
و پایین‌دست دریچه دوار هستند.

برای بررسی افت انرژی دریچه دوار در شرایط جریان آزاد، در شکل (۱۶) تغییرات افت انرژی محاسبه‌شده از رابطه (۹) را برای زاویه‌های مختلف بازشدگی دریچه با هر سه مقدار طول تبدیل تدریجی نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان، افت انرژی در تمامی تبدیل‌های تدریجی افزایش می‌یابد، اما تأثیر تغییرات دبی بر افت انرژی با افزایش زاویه بازشدگی تدریجاً کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در تمامی تبدیل‌ها، افت انرژی با افزایش زاویه بازشدگی کاهش می‌یابد، به طوری که برای یک دبی ثابت، بیشترین افت انرژی مربوط به زاویه بازشدگی ۳۵ درجه و کمترین آن به زاویه ۸۵ درجه تعلق دارد. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی و محدوده پارامترهای مورد بررسی، رابطه بین دبی عبوری از دریچه و افت انرژی در شرایط جریان آزاد را می‌توان تقریباً به صورت خطی در نظر گرفت. این تقریب امکان تحلیل و ارائه روند کلی تأثیر تغییر زاویه بازشدگی و طول تبدیل تدریجی بر افت انرژی را فراهم می‌کند، هر چند در جزئیات ریز هیدرولیکی ممکن است تغییرات غیرخطی نیز رخ دهد.

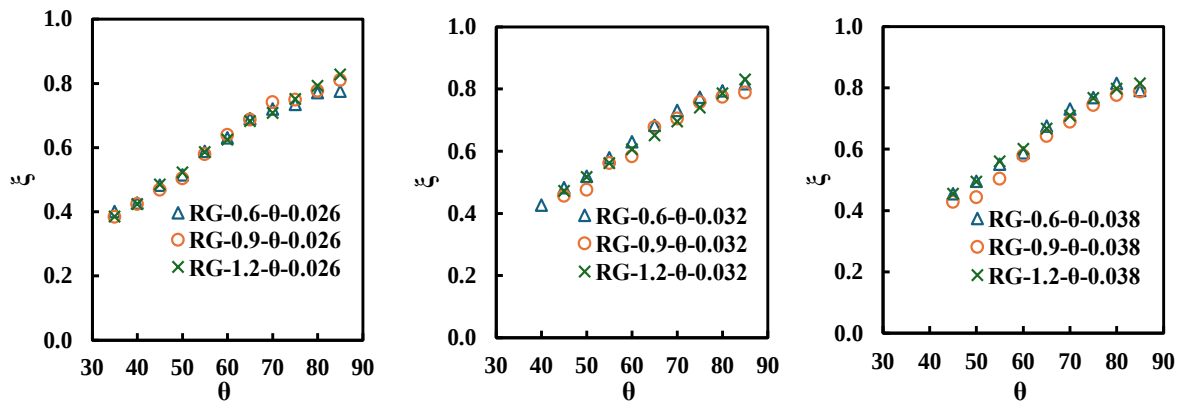
در شکل (۱۷) تغییرات افت انرژی نسبی (نسبت افت انرژی به انرژی در بالادست دریچه) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه دوار و با فرض دبی ثابت، افت انرژی کاهش می‌یابد. همچنین، با تغییر دبی، افت



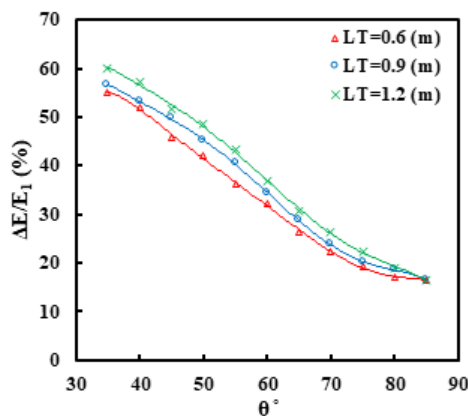
شکل ۱۶ تغییرات افت انرژی محاسبه شده از رابطه



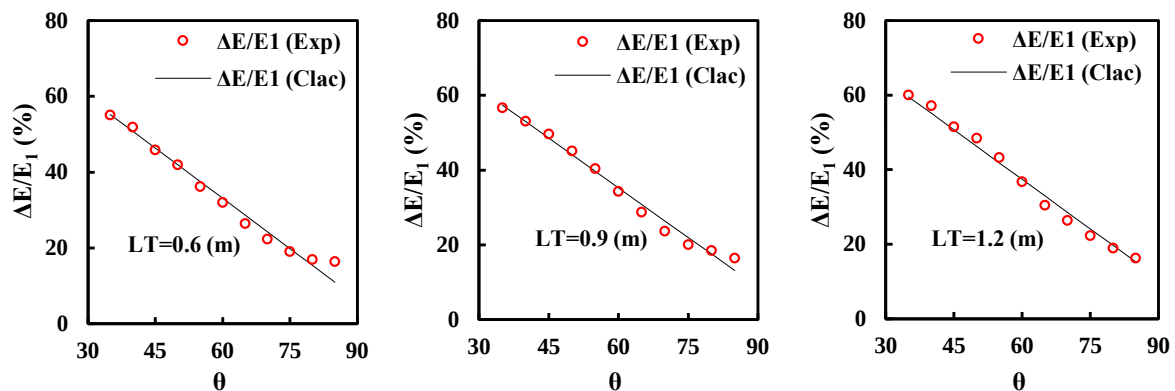
شکل ۱۷ تغییرات افت انرژی نسبی با دبی جریان



شکل ۱۸ تغییر در ضریب $\Delta E/E_1$ در مقابل زاویه بازشدگی دریچه دوار



شکل ۱۹ اثر طول تبدیل تدریجی بر افت انرژی نسبی



شکل ۲۰ مقایسه افت انرژی نسبی به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی با افت محاسبه شده از رابطه (۱۰)

بازشدگی ۳۵ درجه (تقریباً ۶۰ درصد) مشاهده می‌شود، در حالی که کمترین افت انرژی در زاویه ۸۵ درجه (حدود ۱۵ درصد) رخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان عبوری از

افت انرژی نسبی به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی با افت انرژی محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱۰) در شکل (۲۰) مقایسه شده است. همان طور که مشخص است، رابطه (۱۰) تخمین قابل اعتمادی از افت انرژی نسبی دریچه دوار را در شرایط جریان آزاد ارائه می‌دهد. بیشترین افت انرژی در زاویه

هیدرولیکی بهینه، توصیه می‌شود طول تبدیل حداقل برابر با عرض کانال در نظر گرفته شود و از آن کمتر نباشد.

فهرست علائم

L	طول تبدیل تدریجی (متر)
θ	زاویه بازشدگی دریچه دوار (رادیان)
Q	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)
y_1	عمق آب در بالادست دریچه دوار (متر)
y_2	عمق آب در پایین‌دست دریچه دوار (متر)
g	شتاب گرانشی (متر بر مجذور ثانیه)
W_R	عرض سطح آب در سمت راست دریچه دوار (متر)
W_L	عرض سطح آب در سمت چپ دریچه دوار (متر)
A_R	سطح مقطع سمت راست دریچه دوار (مترمربع)
A_L	سطح مقطع سمت چپ دریچه دوار (مترمربع)
A_w	مجموع سطح مقطع سمت راست و چپ دریچه دوار (مترمربع)
y_{Max}	بیشینه عمق جریان (برابر با ۰/۳ متر)
X	طول اندازه‌گیری پروفیل سطح آب در آزمایش‌ها (برابر با ۷ متر)
Q_R	دبی عبوری از سمت راست دریچه دوار (مترمکعب بر ثانیه)
Q_L	دبی عبوری از سمت چپ دریچه دوار (مترمکعب بر ثانیه)
u	سرعت جریان در راستای جریان (متر بر ثانیه)
ΔE	افت انرژی (متر)
E_1	انرژی در بالادست دریچه دوار (متر)
E_2	انرژی در پایین‌دست دریچه دوار (متر)
$\Delta E/E_1$	افت انرژی نسبی (درصد)
B	عرض کانال آزمایشگاهی (متر)
u_1	سرعت جریان در بالادست دریچه دوار (متر بر ثانیه)
u_2	سرعت جریان در پایین‌دست دریچه دوار (متر بر ثانیه)
	نسبت عمق پایین‌دست به عمق بالادست دریچه در شرایط جریان آزاد

سپاسگزاری

دریچه دوار و کاربرد آن در کانال مستطیلی پرداخته است. این دریچه برای دامنه وسیعی از متغیرهای هندسی و هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها، نتایج زیر به دست آمد:

برخورد جریان با لبه دریچه دوار، موجب تقسیم جریان و تغییرات عرضی در پروفیل سطح آب می‌شود. نتایج نشان داد با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، این تغییرات کاهش می‌یابد؛ به طوری که بیشترین تغییرات در زاویه ۳۵ درجه و کمترین در زاویه ۸۵ درجه مشاهده شد. سرعت جریان در سمت راست دریچه به طور قابل توجهی بیشتر از سمت چپ است، اما با افزایش زاویه بازشدگی، سرعت و دبی عبوری از سمت راست کاهش می‌یابد.

جریان عمدتاً از سمت راست عبور می‌کند، خطوط جریان در این ناحیه فشرده‌تر می‌شود و سرعت افزایش می‌یابد، در حالی که در سمت چپ، به دلیل عدم فشردگی، جریان کمتر و سرعت پایین‌تر است. تغییر زاویه بازشدگی تأثیر چندانی بر سرعت جریان در مقطع سمت چپ ندارد؛ افزایش دبی در این بخش بیشتر ناشی از افزایش سطح مقطع جریان است که طبق معادله پیوستگی، موجب افزایش دبی می‌شود.

با افزایش زاویه بازشدگی، دبی عبوری از سمت چپ بیشتر و از سمت راست کمتر می‌شود؛ بنابراین، درصد بیشتری از جریان از سمت چپ عبور می‌کند. همچنین، افزایش طول تبدیل تدریجی باعث کاهش دبی در سمت چپ و افزایش آن در سمت راست می‌گردد. به طور کلی، با افزایش زاویه بازشدگی یا کاهش طول تبدیل، درصد دبی عبوری از سمت چپ افزایش می‌یابد و برعکس.

افزایش دبی جریان باعث افزایش افت انرژی در تمام تبدیل‌های تدریجی می‌شود، اما تأثیر آن با افزایش زاویه بازشدگی کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش زاویه بازشدگی، افت انرژی کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که برای دبی ثابت، بیشترین افت مربوط به زاویه ۳۵ درجه و کمترین آن مربوط به زاویه ۸۵ درجه است. در پایان، روابطی دقیق برای محاسبه دبی عبوری از دو سمت دریچه و افت انرژی در شرایط جریان آزاد ارائه شد.

برای نصب دریچه دوار در کانال‌هایی با مقیاس‌های مختلف، سه عامل اصلی شامل عرض کانال، عمق کانال و طول تبدیل تدریجی باید مد نظر قرار گیرد. به منظور حفظ عملکرد

مراجع

- [1] H. R. Henry, "Discussion of diffusion of submerged jets by M. L. Albertson, Y. B. Dai, R. A. Jensen, H. Rouse," *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 115, no. 1, pp. 665–693, 1950. [Online].
- [2] T. B. Benjamin, "On the flow in canals when rigid obstacles are placed in the stream," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 1, pp. 227–248, 1956. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/S0022112056000147>
- [3] N. Rajaratnam and K. Subramanya, "Flow equation for the sluice gate," *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, vol. 93, no. IR3, pp. 167–186, 1967. [Online].
- [4] P. K. Swamee, "Sluice-gate discharge equations," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 118, no. 1, pp. 56–60, 1992. [Online].
- [5] J. Vanden-Broeck, "Numerical calculations of the free-surface flow under a sluice gate," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 330, pp. 339–347, 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/S0022112096003849>
- [6] Roth and W. H. Hager, "Underflow of standard sluice gate," *Experiments in Fluids*, vol. 27, no. 4, pp. 339–350, 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/S003480050358>
- [7] V. Ferro, "Simultaneous flow over and under a gate," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 126, no. 3, pp. 190–193, 2000. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:3\(190\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:3(190))
- [8] D. G. Kim, "Numerical analysis of free flow past a sluice gate," *Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 127–132, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/BF02823856>
- [9] D. Lozano, L. Mateos, G. P. Merkley, and A. J. Clemmens, "Field calibration of submerged sluice gates in irrigation canals," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 135, no. 6, pp. 763–772, 2009. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000085](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000085)
- [10] G. Belaud, L. Cassan, and J. P. Baume, "Calculation of contraction coefficient under sluice gates and application to discharge measurement," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 135, no. 12, pp. 1086–1091, 2009. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000122)
- [11] A. Habibzadeh, A. R. Vatankhah, and N. Rajaratnam, "Role of energy loss on discharge characteristics of sluice gates," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 137, no. 9, pp. 1079–1084, 2011. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000406](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000406)
- [12] M. Bijankhan, V. Ferro, and S. Kouchakzadeh, "New stage-discharge relationships for radial gates," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 139, no. 5, pp. 378–387, 2013. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000556](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000556)
- [13] M. Bijankhan and S. Kouchakzadeh, "The hydraulics of parallel sluice gates under low flow delivery condition," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 41, pp. 140–148, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.017>
- [14] F. Salamasi and J. Abraham, "Expert system for determining discharge coefficients for inclined slide gates using genetic programming," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 146, no. 12, pp. 06020013:1–9, 2020. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001520](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001520)

- [15] H. Khalili Shayan, J. Farhoudi, and A. R. Vatankhah, "Solutions for estimating opening of sluice and radial gates for flow regulation," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 147, no. 3, pp. 06021001:1–13, 2021. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001541](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001541)
- [16] W. Meng, L. Li, S. Zhao, and P. Li, "Flow regime discrimination and methodology for calculating discharge in trapezoidal sluice gates," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 100, p. 102710, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w17030456>
- [17] T. Hashem, A. Y. Mohammed, and T. J. Alfatlawi, "Hydraulic characteristics of labyrinth sluice gate," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 96, p. 102556, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102556>
- [18] A. Marashi, "Hydraulics of butterfly gate: determination of specifications and application criteria in the canal," Ph.D. dissertation, University of Lorestan, 2019. [Online]. Available:
- [19] Marashi, H. A. Yonesi, S. Koochakzadeh, and H. Torabi Poudeh, "Evaluation of efficiency of the butterfly gate as a structure for control and flow measurement in semi-circular canals," *Journal of Irrigation and Water Engineering*, vol. 11, no. 42, pp. 1–13, 2020. [Online].
- [20] Marashi, S. Kouchakzadeh, H. A. Yonesi, and H. Torabi Poudeh, "Hydraulics of rotary gate: novel structure for semi-circular canals," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 147, no. 4, pp. 04021003:1–10, 2021. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001537](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001537)
- [21] M. Kheiraie, H. Yonesi, B. Shahinejad, H. Torabi Poudeh, and A. Marashi, "Laboratory investigation of the application of semi-circular rotary gate within a rectangular canal," *Environmental Water Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 485–574, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/ewe.2025.537171.2045>

